



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VED A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

HISTORIE NEŽELEZNÝCH KOVU V LETECKÉM PRUMYSLU

THE HISTORY OF NON-FERROUS ALLOYS IN AIRCRAFT INDUSTRY

BAKALÁRSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PŘEMYSL DUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových ved a inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Premysl Dušek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Reditel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním rádem VUT v Brně urcuje následující téma bakalářské práce:

Historie neželezných kovů v leteckém průmyslu

v anglickém jazyce:

The History of Non-Ferrous Alloys in Aircraft Industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je sepsat pojednání o historii využití neželezných kovů v leteckém průmyslu a zhodnotit význam jednotlivých materiálů pro letecký průmysl.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Definice požadavků na materiály používané v letectví
- 2) Popis vybraných neželezných kovů
- 3) Přínos jednotlivých materiálů v konstrukci letadel
- 4) Zhodnocení role jednotlivých materiálů na letectví

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá lehkými neželeznými kovy, konkrétně podává obecný přehled hořčíkových slitin, shrnuje jejich výhody i nevýhody a popisuje jednotlivé skupiny hořčíkových slitin dle legujících prvků. Zmiňuje také tepelné zpracování a technologické vlastnosti hořčíkových slitin. Částečně je uvedeno i srovnání se slitinami hliníku. Druhá část práce je věnována aplikaci hořčíkových slitin v konstrukci letadel, a to jak z pohledu historie (období 2. světové války), tak i u novodobých letadel.

Klíčová slova

Neželezné kovy, slitiny hořčíku, letecká konstrukce

Abstract

Main part bachelor work be concerned common description magnesium alloys,compare with aluminium alloys,benefits or disadvantages magnesium alloy,describe groups of magnesium alloys after alloying component,technological properties and heat treatment.Next part my bachelor work includes application magnesium alloys in aircraft constructions from second worl war in Germany to present day.

Key words

Nonferrous alloys, magnesium alloys, aircraft construction

Bibliografická citace

DUŠEK, P. *Historie neželezných kovů v leteckém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Historie Neželezných kovů v leteckém průmyslu jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Dne 21.5.2011

.....
Přemysl Dušek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D. za trpělivý a inspirující přístup při řešení bakalářské práce

Osnova

1	Úvod	2
2	Hořík	3
2.1	Čistý hořík	3
2.2	Výroba hoříku	3
2.2.1	Suroviny pro výrobu hoříku	3
2.3	Vlastnosti hoříku	3
2.3.1	Mechanické vlastnosti hoříku	4
2.3.2	Technologické vlastnosti slitin hoříku	4
2.3.3	Použití čistého hoříku	5
3	Slitiny Hoříku	6
3.1	Slévárenské slitiny hoříku	6
3.2	Tvářené slitiny hoříku	7
3.3	Slitiny Mg-Al	8
3.3.1	Intermetalická fáze Mg ₁₇ Al ₁₂	9
3.3.2	Slitiny Mg-Al-Zn	10
3.3.3	Slitiny Mg-Al-Si	10
3.3.4	Slitiny Mg-Al-RE	10
3.3.5	Slitiny Mg-Al-Ca	10
3.3.6	Slitiny Mg-Al-Sr	10
3.4	Slitiny s ytrem	10
3.5	Slitiny Mg-Mn	10
3.6	Slitiny Mg-Sc	11
3.7	Slitiny Mg-Zn	11
3.7.1	Slitiny Mg-Zn-Zr	11
3.7.2	Slitiny Mg-Zn-Zr-Nd	11
3.7.3	Slitiny Mg-Zn-Zr-Th	11
3.7.4	Slitiny Mg-Zn-Zr-RE	12
3.7.5	Slitiny Mg-Sm(samarium) a Mg-Er(Erbium) vývojové materiály	12
3.8	Slitiny Mg-Li	12
3.8.1	Slitiny Mg-Li-Me	13
4	Tepelné zpracování hoříkových slitin	14
5	Značení hoříkových slitin	15
6	Předválečná a meziválečná historie slitin hoříků	16
6.1	Slitiny hoříku používané v německu v období druhé světové války	17
7	Využití hoříkových slitin v konstrukci letadel	18
7.1	Využití hoříkových slitin historické v Německém průmyslu	18
7.2	Využití hoříkových slitin v současné době	19
8	Závěr	22
9	Literatura:	23

1 Úvod

Hořčíkové slitiny jsou v posledních letech velmi výrazně se rozvíjející materiálovou skupinou. Jejich největší výhoda spočívá v nízké měrné hmotnosti hořčíku, jejich nevýhodou je nízká korozivzdornost a žáruvzdornost, v některých případech horší mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti se ovšem dají částečně upravit vhodnými legujícími prvky. Velká část z objemu výroby hořčíku připadá na legování slitin hliníku, další část na výrobu hořčíkových slitin. Nejčastěji využívaná technologie při výrobě hořčíkových slitin je tlakové lití, další ale méně často využívanou technologii je lití do pískových forem a nejmenší část výroby hořčíkových slitin zaujímá tváření hořčíkových slitin. V ČR je hlavním výrobcem hořčíkových slitin ČKD Hradec Králové, kde jsou odlitky vyráběny odléváním do pískových forem.

Hořčíkové slitiny bývají často srovnávány se slitinami hliníku. Oproti slitinám hliníku však dosahují hořčíkové slitiny horších hodnot vlastností, zvláště mechanických. Zajímavostí hořčíkových slitin je dobrý poměr R_m/ρ , podle které mají lepší vlastnosti slitiny hořčíku než slitiny hliníku. Tyto vlastnosti se dají hlavně využít v letectví. V dnešní době můžeme nalézt hořčíkové slitiny prakticky všude, např. jako kryty mobilů, v automobilovém průmyslu disky kol, v letectví držáky leteckých motorů, kryty nebo části leteckých a automobilových motorů, části konstrukcí letadel, části do převodových skříní.

Předkládaná práce se zabývá právě popisem hořčíku a jeho slitin, s důrazem na aplikace v letectví.

2 Hořčík

Hořčík byl objeven roku 1808 sirem Humpreyem Davym. Kolem roku 1837 se podařilo poprvé izolovat hořčík v kovové formě, bylo to ve Francii. Později, roku 1857, byla spuštěna, také ve Francii, první průmyslová výroba hořčíku. První využití kovového hořčíku bylo takové, že sloužil jako zdroj světla při fotografování. Výroba ve Francii byla ovšem příliš nákladná a neekonomická, tudíž nemohlo dojít k hromadnějšímu využívání hořčíku. Až roku 1897 v Německu se podařilo vyrábět hořčíkové slitiny výhodnější metodou elektrolýzy, což vedlo k rozšíření použití hořčíkových slitin. Jednou z prvních firem, která se v Německu zabývala výrobou hořčíkových slitin byla firma Chemische Fabrik Griesheim-Elektron v Bitterfeldu, která prodávala svoje výrobky pod názvem "elektron" již na konci 19.století. Tento název až do dneška přetrval a slitiny pod tímto názvem jsou dnes nejužívanější a nejznámější hořčíkové slitiny.

Z toho, že byla v Německu zavedená hromadná průmyslová výroba hořčíkových slitin jako první plyne, že Německo mělo až do začátku 1.sv. války monopol na výrobu slitin hořčíku. Po vypuknutí první světové války se vlivem špionáže začaly postupně slitiny hořčíku hromadně vyrábět také ve Velké Británii a Francii. Ale i přes tlak okolních zemí a porážce ve válce si Německo dokázalo udržet vůdčí pozici ve výrobě slitin hořčíku i v meziválečném období, kdy se zde neustále vyráběla polovina jeho celosvětové produkce. V samotném Německu byl hořčík získáván zejména z odpadních louhů při zpracování Stassfurtských solí, ale i dalších surovin. V dnešní době jsou největšími producenty kovového hořčíku USA, Norsko, Rusko, Itálie, Izrael, Kanada a Čína.

2.1 Čistý hořčík

Planeta země obsahuje ve své kůře přibližně 2% hořčíku. A to ve formě magnezitové rudy jako uhličitan hořečnatý $MgCO_3$, nebo dále jako dolomit $CaMg(CO_3)_2$, a v dalších méně významných minerálech. Možnost průmyslové výroby hořčíku dovoluje také mořská voda, která obsahuje především chlorid hořečnatý $MgCl_2$.

2.2 Výroba hořčíku

Jsou dva způsoby výroby, a to elektrolýzou nebo termickou redukcí. Oba tyto způsoby výroby jsou ovšem energeticky náročné, nutná je i poměrně speciální technologie výroby a v neposlední řadě je potřeba dbát na zvýšené riziko bezpečnostní a environmentální. I přes své rozšíření v přírodě se hořčík vyrábí jen v několika málo státech, což je určitý odraz vyspělosti daného státu v porovnání s okolním světem.

2.2.1 Suroviny pro výrobu hořčíku

Hořčík je poměrně hojně obsažen v zemské kůře. Jeho zdroje jsou považovány za nevyčerpatelné díky tomu, že je obsažen ve vodě a minerálech, pro samotnou výrobu hořčíku se používají nejčastěji oxidické a chloridové suroviny.

K oxidickým surovinám patří magnezit $MgCO_3$, jehož naleziště (tzv. breuneretického typu magnezitu) jsou i na Slovensku. Další surovinou je Dolomit $CaMg(CO_3)_2$. K chloridovým surovinám patří Karnalit KCl , Bischofit $MgCl_2$ a mořská voda.

2.3 Vlastnosti hořčíku

Hořčík je stříbrolesklý kov, který na vzduchu reaguje a je pokryt vrstvičkou oxidů. Jeho měrná hmotnost činí 1740kg/m^3 . Teplota tavení čistého hořčíku je 650°C , teplota varu čistého hořčíku je 1090°C . Hořčík má těsnou hexagonální mřížku a jeho oxidační číslo je 2. Může reagovat s různými prvky, při reakci s kyslíkem vznikají oxidy, s dusíkem vznikají nitridy, při slučování s halogenidy vznikají halogenidy, nebo se také může slučovat se sírou a

vznikají sulfidy. Při porovnání hořčíku s čistým hliníkem má čistý hořčík vyšší pevnost, ale i přes tuto výhodu je jeho využití jako konstrukčního materiálu přesto nízká, z důvodů některých špatných mechanických vlastností.

Tabulka 1: Základní vlastnosti čistého hořčíku

atomové číslo	12
atomová hmotnost	24,31
hustota při 20°C	1740 kg.m ⁻³
teplota tavení	650°C
teplota varu	1090°C
modul pružnosti	45GPa
součinitel stahování při tuhnutí	4,20%
měrná tepelná kapacita(20°C)	1,03KJ/kgk
skupenské teplo tání	372KJ/kg
Tepelná vodivost	155W/mk

2.3.1 Mechanické vlastnosti hořčíku

Největší předností hořčíku je nízká měrná hmotnost (1740 kg/m³). Další předností hořčíku a hlavně hořčíkových slitin je dobrá měrná pevnost, srovnatelná s obdobnými charakteristikami u slitin hliníku a ocelí. Mezi další kladné vlastnosti hořčíku dále patří schopnost tlumení vibrací a také dobrá obrobiteľnosť. Nedostatkem hořčíkových slitin oproti hliníkovým je jejich složitá výroba a technologické zpracování oproti slitinám hliníku. Dalším negativem je jeho malá tvárnosť za nízkých teplot, tvárnějším se stává hořčík až od 225°C. Problém je také vysoká reaktivita hořčíku za vysokých teplot, a nízká rychlost difúze při tepelném zpracování. Nežádoucími vlastnostmi slitin hořčíku jsou rovněž nízká houževnatost (KV = 3 až 9J), nízký modul pružnosti a v porovnání se slitinami hliníku obtížnější svařitelnost, nízká tvrdost a odolnosť proti opotřebeniu.

2.3.2 Technologické vlastnosti hořčíku

Mezi nejvyužívanější technologie při odlévání hořčíkových slitin patří odlévání. To se provádí do pískových forem, skořepin, kokil. Používá se gravitační nebo tlakové lití.

Tváření hořčíkových slitin je určeno hexagonální mřížkou hořčíku, je třeba ho provádět za tepla. Mezi tvářecí technologie patří protlačování, kování a válcování.

Spojování hořčíkových slitin je možné všemi dostupnými způsoby nýtování, lepení, svařování i pomocí šroubů. Při obloukovém svařování v inertním plynu, musíme počítat s různými specifiky, jako jsou tvar svařovaných dílů a materiál přídavného kovu. Jako přídavný materiál se vesměs používá slitina, která se svařuje. Nejlepší výsledky svařování jsou dosahovány u slitin s thoriem nebo manganem. Bodové a švové svařování se hodí pro statické namáhání, ale není vhodné pro únavové namáhání nebo vibrace.

Důležitá a výhodná metoda spojování hořčíkových slitin je metoda lepení. Únavové charakteristiky jsou lepší než u jiných metod spojování hořčíkových slitin. Výhodou je také to, že je omezen vznik míst, kde se koncentruje napětí (strukturní a mechanické vruby). Tato technologie se hodí především pro tenkostěnné výrobky, z čehož vyplývá, že se hodí i pro letecký průmysl.

Další metodou spojování hořčíkových slitin je nýtování, kde se však musí brát největší ohled na kvalitu vystřiženého otvoru u plechu, protože při nekvalitním vystřížení vznikají prasklinky, které ovlivňují nosnost spoje. Při volbě materiálu nýtu se musí dbát na to, aby nýt se základním materiálem netvořil elektrický mikročlánek.

Řezné obrábění je technologie tvarování pro hořčíkové slitiny velmi výhodná. Důvodem je vynikající obrobiteľnosť při použití velké škály rezných rychlostí. Obráběním za

mokra v emulzích se dosahuje výborných kvalit obráběného povrchu. Pro obrábění se nejčastěji používají nástroje ze slinutých karbidů, rychlořezné oceli a nástroje keramické. Při použití olejo-vodných emulzí pro obrábění za mokra je třeba brát v úvahu možnost vývoje plynného vodíku, který je v koncentracích 4 až 74 % vznětlivý. [6]

2.3.3 Použití čistého hořčíku

Čistý hořčík se využívá především jako redukční činidlo při výrobě titanu a pro modifikaci tvárné litiny. Značné množství hořčíku se spotřebuje při výrobě slitin hliníku, zejména těch, které mají dobrou odolnost proti korozi (řada Al-Mg, Al-Mg-Si). Třetí místo ve spotřebě hořčíku představují hořčíkové slitiny. Hutní hořčík je uveden v ČSN 424995 [4]. V posledních letech ovšem neustále více stoupa spotřeba hořčíku právě při výrobě hořčíkových slitin.

3 Slitiny Hořčíku

3.1 Slévárenské slitiny hořčíku

Obvyklé slitiny hořčíku k odlévání mají větší množství přísad než slitiny pro tváření. Mají poměrně hrubé zrno a jejich krystalizace probíhá odlišně od rovnovážného diagramu. V důsledku toho vzniká chemická heterogenita a proto je nutné tyto slitiny dlouhodobě homogenizačně žíhat, čímž dochází k homogenizaci chemického složení a také ke zvýšení houževnatosti. Po této operaci může následovat ještě umělé stárnutí (přírodní by bylo velmi zdlouhavé), které však nemá tak výrazné účinky jako u hliníkových slitin. Na mezi pevnosti se umělé stárnutí příliš neprojeví, ale při této operaci dochází ke zvýšení meze kluzu. [2]

Slévárenské hořčíkové slitiny se dělí do základních skupin podle přísadových prvků legur, které následně zlepšují jejich mechanické vlastnosti, technologické vlastnosti nebo odolnost proti korozi. Dělí se na Mg-Mn, Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Li, Mg-Zn. Dalšími doplňkovými přísadovými prvky jsou Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácných zemin (La, Ce, Nd, Pr, Sc, Gd, Y).

Výrazným znakem hořčíkových slitin je velká reakčnost hořčíku s kyslíkem a jeho explozivní chování (využití v zápalných pumách), z čehož plyne bezpečnostní riziko při samotné výrobě hořčíkových slitin. V důsledku této velké reakčnosti se při odlévání hořčíkových slitin používají tzv. inhibitory hoření, které omezují (tlumí) reakčnost hořčíku. Nejznámějším a nejpoužívanějším inhibitorem hoření u hořčíkových slitin je síra. Reakce hořčíku a SO_2 probíhá pomaleji než reakce hořčíku s kyslíkem a dusíkem, a právě z tohoto důvodu se SO_2 hojně užívá při ochraně hořčíkových slitin před oxidací jak při samotném lití, tak i v samotné slévárenské formě. Dalším používaným inhibitorem hoření je fluorid síry SF_6 . V praxi se SF_6 používá pro tavení hořčíku a jeho slitin bez tavidel. Hořčíkové slitiny díky velké reakčnosti s okolním prostředím musí být odlévány v ochranné atmosféře nebo pod ochranou struskou, z čehož vyplývají značné metalurgické obtíže při výrobě.

Hlavní část hořčíkových slitin se vyrábí tlakovým litím. Pomocí tohoto lití se dosahuje vysoké produktivity, odlitky mají vyšší přesnost, mohou být tvarově složitější a mají vyšší pevnost. Rychlé ochlazení struktury u tohoto druhu lití způsobí zjemnění zrna, ale na druhou stranu tato rychlost způsobuje také to, že odlitky nejsou nevhodné pro následné svařování a tepelné zpracování. Slitiny vyráběné tlakovým litím se tedy běžně tepelně nezpracovávají. Při srovnání tlakového lití hořčíkových slitin se slitinami hliníku, u hořčíku dosahujeme vyšší produktivity, menší energetické náročnosti, a také dochází k menšímu opotřebení nástrojů, přičemž životnost těchto nástrojů bývá 2-3x vyšší. Navíc u slitin hořčíku se nedělá rozdíl mezi litím do přehřáté a studené formy. U všech komerčních slitin je též rozšířeno lití do písku. Správné zvolení výsledné metody výroby odlitku závisí na mnoha faktorech, jako jsou konstrukce, technologie výroby nebo výsledný tvar odlitku, počet odlitků a slévateľnost litiny.

Výzkum hořčíkových slitin se soustředil na vytvoření slitin s vylepšenými vlastnostmi (pevnost a odolnost proti creepu při vyšších teplotách.) Ve srovnání s nejčastěji používanými slitinami Mg-Al, Mg-Al-Zn mají například slitiny ZK51 a ZK61 zlepšené mechanické vlastnosti, ale nemohou být svařovány. Využití přísady kovů vzácných zemin v hořčíkových slitinách vedlo k vývoji slitin, které mají zlepšenou odlévateľnost a mohou být použity při vyšších teplotách než slitina AZ91. Tyto slitiny jsou EZ33 a ZE41 a jejich výhoda spočívá také v tom, že mohou být dále tepelně zpracovány. Speciální požadavky leteckého průmyslu na vyšší teploty (kolem 250°C) vyvolaly další vývoj hořčíkových slitin. Slitiny AZ a ZE byly vylepšeny thoriem, což ovlivnilo jejich vlastnosti pozitivně ve směru mechanických vlastností za vyšších teplot, lepší slévateľnosti a svařitelnosti. Další vývoj se soustředil na slitiny s Ag, kde Ag nahradilo Zinek. Došlo ke zlepšení vlastností po tepelném zpracování, a také zjemnění zrna u slitin se zirkoniem. Bohužel nevýhodou těchto slitin je stříbro a jeho vysoké ceny.

Označení této slitiny je např. QE22. Další snahou o vylepšení vlastností byly vyvinuty slitiny s ytrem a vzácnými zeminami jako např. WE34. Tyto slitiny v porovnání se slitinami s thoriem nedosahují takové odolnosti proti creepu, ale dokážou odolávat vyšším teplotám než slitiny s thoriem.

3.2 Tvářené slitiny hořčíku

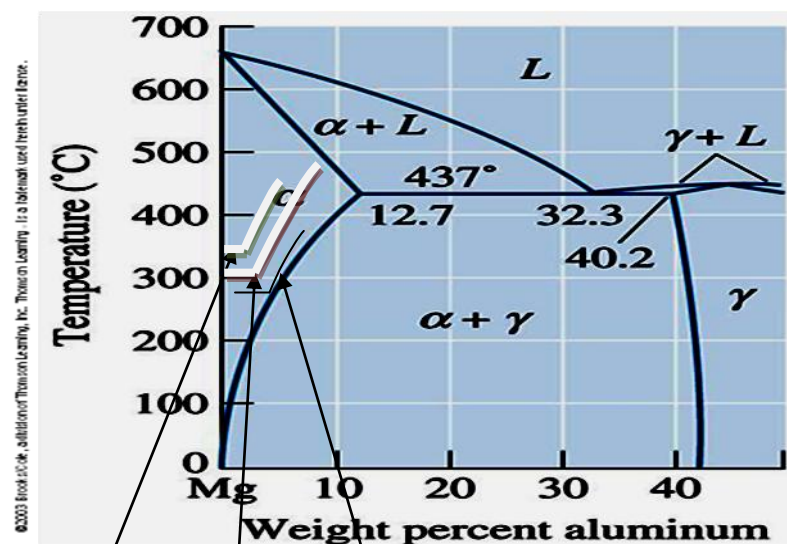
Hořčík krystalizuje v těsně uspořádané hexagonální mřížce, což znamená, že za normálních teplot má nedostatek skluzových systémů, což negativně ovlivňuje tvárnost hořčíkových slitin za normálních teplot. Hořčíkové slitiny se stávají tvárnějšími až od teplot 220°C, kdy je aktivováno více skluzových systémů a působí rekrytalizační procesy. Plastická deformace by měla být volena tak, aby teploty tváření ležely mezi krivkou solidu a krivkou změny rozpustnosti.

Nejčastěji používanými technologiemi pro tváření hořčíkových slitin jsou protlačování profilů, válcování plechů a volné nebo zápusťkové kování. V první fázi technologie zpracování za tepla jsou nejdříve zpracovány horké odlitky. Poté následuje jejich mechanické zpracování pro rozrušení jejich lité mikrostruktury, aby byl odlitek následně připraven pro další zpracování, např. homogenizaci nebo zjemnění zrna. Pro kování a protlačování jsou používány poměrně vysoké teploty. Kovárenskými hořčíkovými slitinami jsou na př. AZ21, AZ31, AZ60, AZ92, AZ80, QE22, ZK40 nebo ZK60. Při válcování dochází ke kontaktu válců a válcovaného plechu poměrně krátce, a tak jsou deformační rychlosti poměrně velké. Typickými slitinami pro válcování jsou AZ31, ZK10, ZK30, ZM21 [6].

Jak již bylo uvedeno, tváření hořčíkových slitin obvykle probíhá za tepla (obr. 1). Jednotlivé technologické procesy tváření hořčíkových slitin probíhají v intervalu teplot:

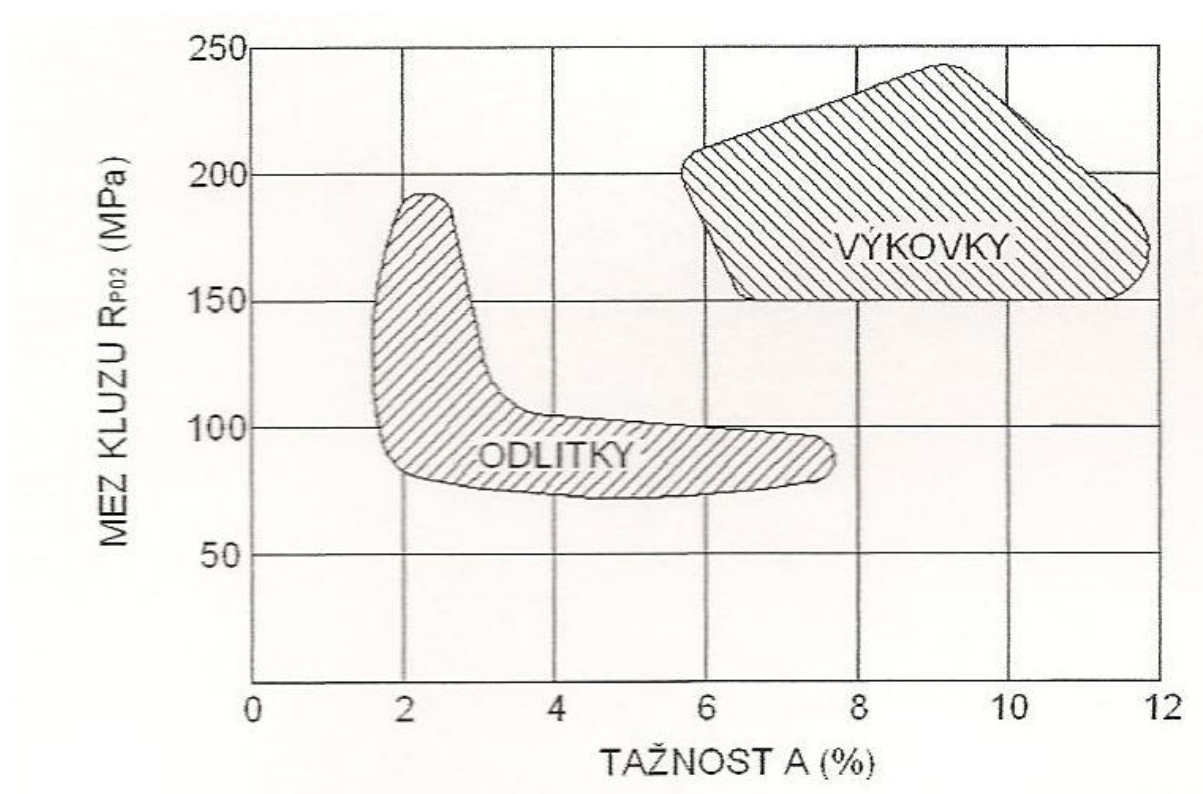
- a) kování v teplotním intervalu 385 - 290 °C
- b) protlačování se v závislosti na chemickém složení slitin provádí v teplotním intervalu 300 až 480 °C;
- b) válcování se provádí v teplotním intervalu 340 až 440 °C, doválcovací teploty se pohybují kolem 225 až 250 °C [1]

Struktura hořčíkové slitiny po tváření má jistou podobnost se slitinami pro odlévání, ale tvářená struktura má svoje vlastní specifika. Deformační zpevnění můžeme u slitin hořčíku využít pouze omezeně. U hořčíkových slitin ke tváření se jako legury nepoužívají kovy vzácných zemin. Hlavními přísadovými prvky jsou Zn (1,5%) a mangan, který zvyšuje odolnost proti korozi. Slitiny obsahující mangan mají zhoršené mechanické vlastnosti, ale zlepšenou svařitelnost i tvařitelnost, mají také dobrou odolnost proti korozi, jsou jednodušší na výrobu i zpracování. Slitiny s manganem se nejčastěji využívají na výrobu plechů a výlisků. Slitiny obsahující zinek a zirkon mají zlepšené mechanické vlastnosti a nejvyšších hodnot mechanických vlastností dosáhnou po precipitačním vytvrzování. Zvláštním druhem slitin jsou slitiny s thoriem, které byly vyvinuty v Rusku a lze je používat i za zvýšených teplot. U těchto slitin dochází k zachování mechanických vlastností až do teplot 350°C.



vÁlcování protlačování kování

Obr 1.: Oblast tvÁření hořčíkových slitin na bázi Mg-Al [13]



Obr. 2.: Mechanické vlastnosti kovaných a odlévaných hořčíkových slitin [1]

3.3 Slitiny Mg-Al

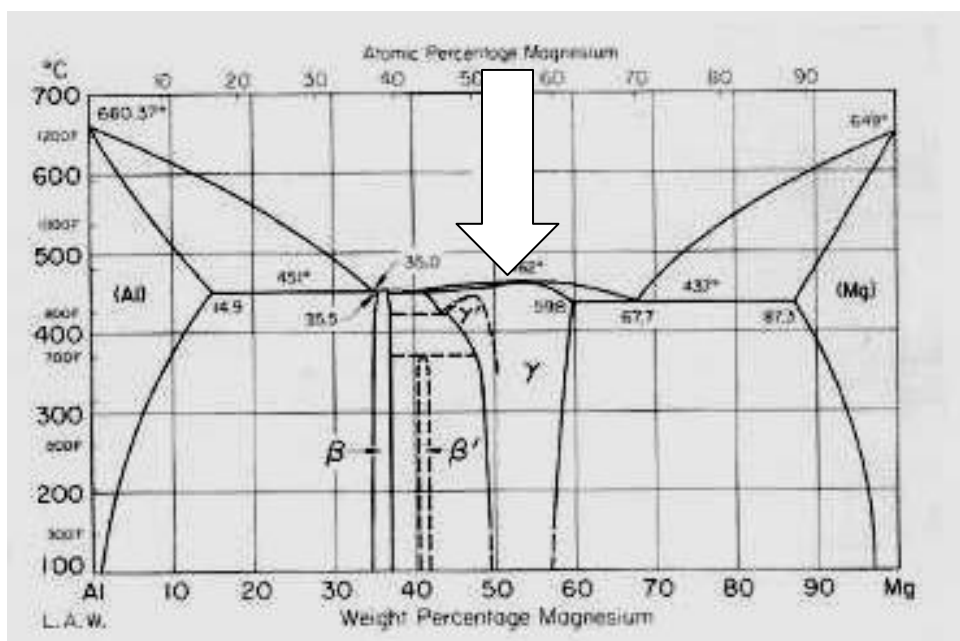
Slitiny na bázi Mg-Al jsou nerozšířenějším a nejstarším typem hořčíkových slitin. Mohou být legovány ještě dalšími přísadovými prvky jako jsou (Zn, Mn, Zr, Th, Ag a Ce). Jejich rozličné vlastnosti jsou dány širokou oblastí výskytu tuhého roztoku α v rovnovážném diagramu Mg-Al (obr. 1) s další možností měnit dané vlastnosti přidáním dalších přísadových prvků.

Nejrozšířenější a nejznámější skupinou těchto slitin je skupina pod názvem "elektron" s obsahem Al 7-10%. Slitiny s vyšším obsahem Al než 7% jsou vytvrditelné a bývají legovány ještě zinkem a manganem. Slitiny jsou tvořeny tuhým roztokem α případně eutektikem $\gamma + \alpha$. Tepelné zpracování je založeno na precipitačním vytvrzování za tvorby precipitátu fáze γ ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Na rozpustnost hliníku v tuhém roztoku α a na polohu eutektického bodu má vliv modifikace, rychlost ochlazování a tlak při lití. Tyto parametry lze tedy v širokých mezích ovlivňovat použitou slévarenskou technologií a je možno jich využít pro výrobu odlitků různých vlastností. [2]

Zinek se ve slitinách Mg-Al rozpouští na hořčík a stává se součástí precipitující fáze. Při poměru $\text{Zn}/\text{Al}=1/3$ vzniká ve slitině Mg-Al- Zn intermetalická fáze $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_3$.

3.3.1 Intermetalická fáze $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$

Významným jevem ve struktuře slitin Mg-Al-Zn je výskyt γ -fáze. Tvrdost této fáze (měřená na jejích krystalech ve slitině AZ91) leží v intervalu 1000-1100HV. Výskyt γ -fáze v rovnovážném diagramu je vidět na obr.3. Zinek, který bývá přítomen v technických slitinách Mg-Al jako třetí komponenta, se v γ -fázi rozpouští a tvoří intermetalikum typu $\text{Mg}_{17}(\text{Al},\text{Zn})_{12}$ [5]. Gama fáze $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ negativně ovlivňuje lomové a deformační vlastnosti slitin Mg-Al, což částečně omezuje jejich použitelnost ve stavbě a konstrukci různých strojů. Na druhou stranu je ve slitinách typu Mg-Al tato gama fáze žádaná, neboť zvyšuje pevnostní charakteristiky.



Obr.3: Rovnovázný diagram Al-Mg s vyznačenou oblastí krystalizace γ -fáze [5]

3.3.2 Slitiny Mg-Al-Zn

Tyto slitiny jsou podskupinou materiálů na bázi Al-Mg. Zpevňující roli zde hraje hliník, zinek má na zpevnění těchto slitin menší vliv. Jejich základní složení Mg s Al v obsazích 7,9 až 9,5% Al spolu s 0,3 až 1,5 % Zn a 0,15 až 0,8% Mn. Pro tuto slitinu, označovanou ve Velké Británii jako BS 2970 MAG7 a ASTM AZ91 B v USA, se používá obchodního názvu elektron. Standardním se pod označením elektron skrývají slitiny AZ91 či AZ81[2]. V ČR lze dohledat tuto slitinu pod označením ČSN 42 4911. Eutektikum v této slitině tvoří směs $\alpha(\delta)$ -fáze (substituční tuhý roztok Al v Mg) a γ -fáze ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Ve slitinách Mg-Al je intermetalická fáze $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ velmi důležitá, protože výrazně ovlivňuje

mechanické vlastnosti. Její binární fáze je velmi křehká a z tohoto důvodu je pouze omezeně použitelná.

3.3.3 Slitiny Mg-Al-Si

Legování slitin Mg-Al křemíkem (Si), vede k tvorbě precipitátu Mg_2Si . Tyto slitiny mají nízkou měrnou hmotnost, vysokou tvrdost a nízký koeficient tepelné roztažnosti. Výhoda těchto slitin tkví v křemíku, kterému chybí schopnost se do určitého obsahu vázat s Al a tím zabraňuje tvorbě γ -fáze. Z tohoto plyne, že tyto slitiny mají velkou tepelnou stabilitu a zvýšenou odolnost proti creepu. Použitelnost těchto slitin je v rozmezí teplot 130 až 150°C. Problémem u těchto slitin jejich slévateľnost, kdy jejich slévateľnost není dobrá do 4%Al. Např. slitina AS21 má horší slévateľnost než slitina AS41.

3.3.4 Slitiny Mg-Al-RE

RE značí kovy vzácných zemin. Tyto slitiny byly vyvinuty zvláště jako creepu odolné. Čisté RE kovy jsou poměrně drahé, a proto se musí používat v kombinaci s převládajícím jedním prvkem (mischmetal). Slitiny mají dobré creepové vlastnosti z toho důvodu, že u nich byla potlačena tvorba γ -fáze, kterou nahrazuje intermetalikum Al-RE. Mez kluzu v tahu závisí především na obsahu RE a dosahuje limitní maximální hodnoty. Nevýhoda slitin hořčíku s kovy vzácných zemin tkví v tom, že se dají pouze tlakově odlévat, protože při nízké rychlosti tuhnutí vzniká hrubá částice Al_2RE , která negativně ovlivňuje vlastnosti.

3.3.5 Slitiny Mg-Al-Ca

Byly vyvinuty jako levnější varianta za slitiny s kovy vzácných zemin. Tyto slitiny jsou rovněž vhodné pro práci za vyšších teplot. Při poměru Ca:Al = 0,8 vznikají částice Mg_2Ca nebo Al_2Ca , obě tyto částice vedou ke zvýšení tvrdosti. S vyšším poměrem Ca:Al roste i hustota těchto částic. Pokud je tento poměr Ca:Al nižší než 0,8, vzniká pouze částice Al_2Ca .

3.3.6 Slitiny Mg-Al-Sr

Stroncium v těchto slitinách rovněž zlepšuje creepové vlastnosti. Tyto slitiny jsou mezi hořčíkovými slitinami novinkou. Jsou různé typy slitin Mg-Al-Sr, jako např. AJ52 nebo AJ62x kombinující dobrou slévateľnost a dobré creepové vlastnosti. Když je poměr Sr:Al příliš malý, tvoří se fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Je-li tento poměr větší, vytvoří se fáze Al_4Sr , která zlepšuje mechanické vlastnosti slitiny.

3.4 Slitiny s yttriem

Tyto lité slitiny mají tradiční uplatnění v leteckém průmyslu. Jsou známé odolností vůči creepu, zejména při kombinaci přísady kovů vzácných zemin s yttriem. Tyto slitiny neobsahují Al a proto je možné zjemnit zrna přísadami Zr. Výborné vlastnosti slitin při pokojové teplotě, a to jak v homogenizovaném stavu, tak při stárnutí, se připisují existenci precipitátu $Mg_{14}Nd_2Y$ a $Mg_{12}Nd_2Y$ [3].

3.5 Slitiny Mg-Mn

U binárních slitin Mg-Mn dochází k výrazné změně rozpustnosti s teplotou. Pod křivkou solidu dochází k precipitaci fáze β , která je bohatá na mangan. Obsah manganu ve slitinách Mg-Mn bývá obvykle 1 až 2 %. Slitiny hořčíku s manganem mají zhoršené slévářenské vlastnosti (nižší zabíhavost, vyšší smršťovitost). Jsou však svařitelné a mají vyšší odolnost proti korozi. Relativně nízké hodnoty mechanických vlastností jsou způsobeny tendencí těchto slitin vytvářet hrubé zrna v průběhu krystalizace. Zjemnění lze dosáhnout malými přísadami křemíku[6].

3.6 Slitiny Mg-Sc

Tyto slitiny jsou intenzivněji zkoumány, neboť odolávají creepu až do teplot 300°C. Vývoj těchto slitin začal poté, co opadl zájem o slitiny s thoriem. Vlastnosti těchto slitin dosahují vyšších kvalit než slitiny s Y a Nd. Zajímavost těchto slitin spočívá v přísadovém prvku skandium (Sc), který má teplotu tání až 1541°C. Další výhodou je nízká měrná hmotnost Sc, která je nižší než u většiny legujících prvků, kromě lithia. Při legování této slitiny dalšími prvky (Y, Nd) se zlepšují vlastnosti této slitiny.

3.7 Slitiny Mg-Zn

Ve slévárenských slitinách bývá obsah zinku 1-2%. Strukturně se hořčíkové slitiny se zinkem příliš neliší od slitin s hliníkem. Ve slitinách s větším obsahem zinku a zároveň hliníku vzniká fáze $Mg_3Al_2Zn_3$. Slitiny se zpracovávají precipitačním vytvrzováním, tj. rozpouštěcím žíháním 380 °C/10hod s ochlazením ve vodě. Stárnutí se buď vynechává (vzniká pouze přesycený tuhý roztok) nebo se výjimečně zařazuje stárnutí umělé [6]. Slitiny zinku se mohou legovat různými přísadami, pro zlepšení odolnosti proti korozi, zlepšení mechanických vlastností, nebo přísadami posouvajícími oblast použitelnosti těchto slitin do vyšších teplot až kolem 300°C. Slitiny hořčíku se zinkem se legují manganem a zirkonem nebo kovy vzácných zemin. Slitiny se zinkem Zr nebo RE, mají lepší creepové vlastnosti než slitiny hořčíku s hliníkem. Navíc mají slitiny hořčíku se zinkem nižší měrnou hmotnost oproti slitinám hořčíku s hliníkem. Obsah zirkonu ve slitinách zinku se pohybuje kolem 0,25 až 0,7 %. Zirkon zjemňuje strukturu, což zlepšuje jejich mechanické vlastnosti.

Hořčíkové slitiny, které obsahují zirkon, se dělí do na tři skupiny:

- slitiny se zinkem a zirkonem,
- slitiny se zirkonem a RE
- slitiny s thoriem.

Zinek má negativní vliv na slitiny tím, že zhoršuje slévárenské vlastnosti, jmenovitě vzniká mikropórovitost, což následně vede ke vzniku trhlin za vyšších teplot. Obsah zinku u těchto slitin se ustálil na 5% a 4%RE. Nejčastěji užívané kovy vzácných zemin jsou ze skupiny lanthanidů (Ce, La Pr, Dy), které mají v tuhém stavu velmi podobný rovnovážný diagram s hořčíkem. Pod křivkou solidu vzniká stabilní fáze $Mg_9(RE)$, která výrazně pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti až do teplot 250°C.

3.7.1 Slitiny Mg-Zn-Zr

Tyto slitiny mají dobré mechanické vlastnosti, zvláště vyšší hodnoty meze kluzu, a díky zirkonu jemnější zrna, menší sklon k mikropórovitosti a také nižší citlivost mechanických vlastností na tloušťku stěny[6]. Navíc jsou tyto slitiny konstrukčně použitelné při zatížení za teplot do 200°C.

3.7.2 Slitiny Mg-Zn-Zr-Nd

Tento typ slitin lze konstrukčně využít do 250°C. Důvodem toho je, že slitiny obsahující neodym a jejich pevnostní charakteristiky klesají s růstem teploty pomaleji než u jiných hořčíkových slitin.

3.7.3 Slitiny Mg-Zn-Zr-Th

Tyto slitiny mohou pracovat při teplotách až kolem 350 °C. Z toho plyne že patří mezi nejvíce žárovevné slitiny hořčíku.

3.7.4 Slitiny Mg-Zn-Zr-RE

Prvky vzácných zemin tvořící součást ceriového směsného kovu, obsahujícího min. 45% ceru [4]". Slitiny s kovy vzácných zemin mohou být použity v pracovním stavu až do teplot 250°C. Jejich vlastnosti odpovídají slitinám s neodymem (Nd), mechanické vlastnosti jsou obdobné jako u jiných hořčíkových slitin.

3.7.5 Slitiny Mg-Sm(samarium) a Mg-Er(Erbium) vývojové materiály

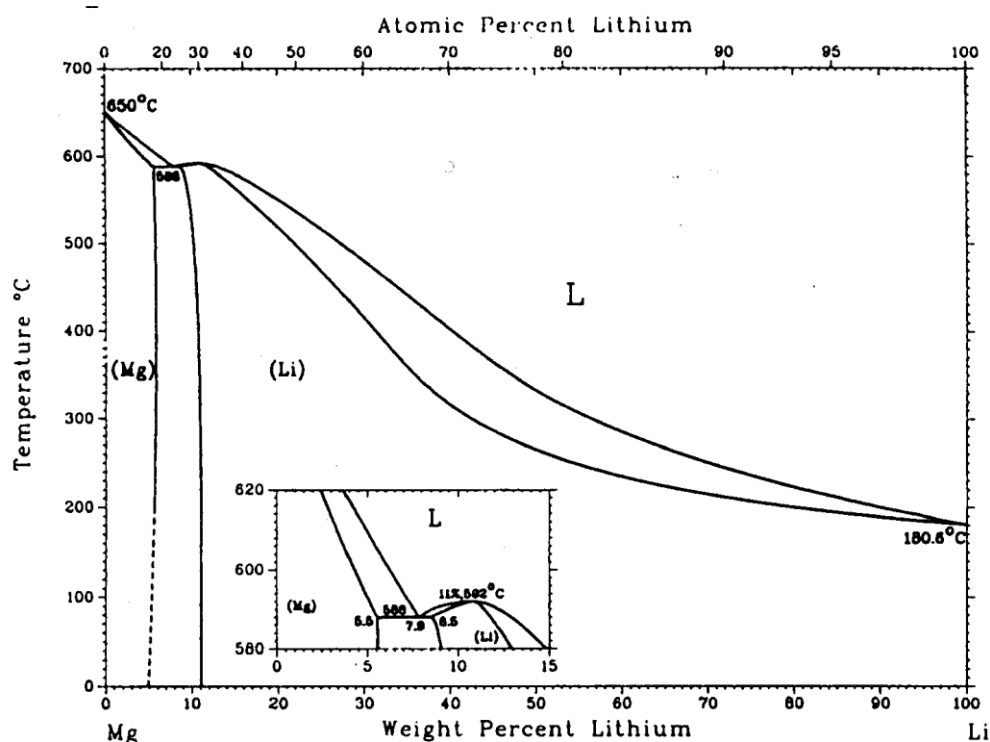
Tyto slitiny hořčíku se používají hlavně pro své výjimečné vlastnosti odolnost při vyšších teplotách v letecké a raketové technice. Další využití skýtá automobilový průmysl, jaderná energetika a měřicí optické přístroje.

3.8 Slitiny Mg-Li

Slitiny hořčíku s lithiem patří mezi slitinami hořčíku k nejlehčím. Dosahují velmi nízkých měrných hmotností v rozmezí 1300-1500 kg/m³ a tudíž jsou i vhodným materiálem pro letecký průmysl. Slitiny hořčíku s lithiem lze rozdělit na slitiny binární a slitiny polykomponentní. Binární slitiny (obr. 4) mohou být podle obsahu lithia tvořeny fází α (do 5,7 hm. % Li), směsí $\alpha + \beta$ (5,7 až 10,4 hm. % Li) a fází β (nad 10,4 hm. % Li). Fáze alfa má hexagonální těsně uspořádanou mřížku, fáze beta je kubická prostorově centrovaná[6].

Krystalická stavba těchto slitin významně ovlivňuje mechanické a technologické vlastnosti. S nárůstem obsahu lithia se pevnost slitiny snižuje. Elastické vlastnosti těchto slitin jsou podobné jako komerčně využívané hořčíkové slitiny (42 až 46 GPa), ale jejich měrná hmotnost je pouhých 1350 až 1330 kg.m⁻³, což znamená, že když tyto hodnoty vztáhneme ke stejné hmotnosti běžných Mg slitin, mají tyto slitiny 2x větší tuhost než jiné obvykle využívané hořčíkové slitiny a asi 5x větší tuhost než slitiny hliníku.

Mezi nedostatky hořčíkových slitin s lithiem patří především vysoká reakčnost v roztaveném stavu, nestabilní mechanické vlastnosti za pokojových teplot a malá odolnost proti tečení. Nejvýznamnějším problémem je jejich výroba, která spočívá v rozdílu teplot tání obou kovů a také rozdílných měrných hmotností obou kovů. S touto nákladnější výrobou souvisí i jejich vysoká cena. Z toho plyne, že tyto slitiny byly využity zatím pouze v kosmickém a leteckém průmyslu.



Obr 4.: Rovnovážný diagram Mg-Li [5]

3.8.1 Slitiny Mg-Li-Me

Slitiny hořčíku s lithiem mají nízkou pevnost v tahu, proto bylo vyvinuto mnoho slitin s dalšími přísadovými prvky, které způsobují vytvrzování těchto slitin. I přes toto vylepšení přísadovými prvky mají slitiny poměrně špatné mechanické vlastnosti ve vytvrzeném stavu. Nedostatkem slitin s lithiem je také velká náchylnost ke korozi, hlavně u slitin, které mají větší obsah lithia. Slitiny Mg-Li se také vyznačují velkou mechanickou nestabilitou, způsobenou lithiem, které tvoří ve slitině oblasti obohacené pouze lithiem, což vede k nestabilním mechanickým vlastnostem už za pokojových teplot. Tento nežádoucí pochod lze potlačit přísadou prvků s vysokou afinitou k lithiu, např. vodíkem. Takové materiály se připravují roztavením základní slitiny v atmosféře argonu, jejím zpracováním v plazmatu, následujícím rozprášením v inertním plynu a kompaktizováním.[6]

4 Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Způsob tepelného zpracování závisí především na chemickém složení hořčíkové slitiny a na konečném využití a vlastnostech součástí. Při srovnání slitin hořčíku se slitinami hliníku je potřeba podstatně delší doba na tepelné zpracování, až kolem 16 hodin. Je to z toho důvodu, že difusní přeměny probíhají ve slitinách hořčíku pomaleji než přeměny ve slitinách hliníku. Navíc je možné pouze umělé stárnutí hořčíkových slitin.

Samotné tepelné zpracování hořčíkových slitin probíhá většinou v elektrických komorových pecích, nebo ve vakuových pecích. Tyto pece jsou automaticky teplotně regulovatelné s přesností $\pm 5^{\circ}\text{C}$ a zároveň jsou vybaveny nuceným oběhem atmosféry. Tato atmosféra zabraňuje oxidaci hořčíkových slitin, a její složení se doporučuje 0,7-1% oxidu siřičitého se vzduchem. Ohřev odlitků ze slitin hořčíku můžeme provádět také v taveninách solí, ve směsi dvojchromanu sodného a draselného. Naopak dusičnany nebo kyanidy jsou zakázány kvůli vysokému nebezpečí výbuchu, otravy, požáru.

Homogenizační žíhání

Toto žíhání odstraní nerovnovážné rozdělení přísadových prvků v objemu hořčíkové slitiny po krystalizaci, a z toho plyne, že dojde ke zlepšení pevnostních a deformačních charakteristik hořčíkové slitiny.

Žíhání na snížení vnitřního pnutí

Po operaci, která zavinila vznik pnutí, se provádí právě toto žíhání. Žíhání se provádí v teplotách 235-290 $^{\circ}\text{C}$.

Rekrystalizační žíhání

Toto žíhání má menší význam, protože hořčíkové slitiny se dají tvářet pouze za tepla. Používají se teploty 250 až 350 $^{\circ}\text{C}$, protože za vyšších teplot dochází k hrubnutí zrna, což znamená, že se zhoršují mechanické vlastnosti. Rekrystalizační žíhání se provádí jako mezioperace při tváření hořčíkových slitin za studena.

Vytvrzování

Vytvrzování se používá jen u slitin, kde je dostatečně velký nárůst pevnosti. Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího ohřevu a po rozpouštěcím ohřevu následuje umělé stárnutí. Existují druhy hořčíkových slitin, kde se doporučuje provést umělé stárnutí, bez rozpouštěcího ohřevu. Zajímavostí ochlazování hořčíkových slitin je, že z teploty rozpouštěcího ohřevu můžeme volně chladit slitinu na vzduchu nebo ve vřelé vodě.

5 Značení hořčíkových slitin

Hlavní značení legujících prvků v hořčíkových slitinách odpovídá značkám:

A	hliník
C	měď
E	kovy vzácných zemin (RE)
H	thorium
K	zirkonium
L	lithium
M	mangan
Q	stříbro
S	křemík
W	ytrium
Z	zinek
X	vápník
J	stroncium

A následně číslice za těmito značkami odpovídají jejich obsahu ve slitině hořčíku. Např. AZ91 značí, 9%hliníku a 1%zinku, složení se zaokrouhluje na celá čísla. U upřesněného označení se za základním označením udává ještě jedno písmeno, které určuje čistotu slitiny, např. AZ91 A,B,C...,E .Často bývá také označení i pro tepelné zpracování, které je odděleno pomlčkou na př. AZ91A-T6. Za touto pomlčkou se mohou udávat i jiné informace o zpracování hořčíkové slitiny, nikoliv pouze tepelné zpracování.

Tabulka značení tepelného zpracování u hořčíkových slitin

T1	ochlazování a přirozené stárnutí
T2	žihání(pouze u odlitků)
T3	rozpouštěcí žihání a deformace za studena
T4	rozpouštěcí žihání
T5	ochlazení a umělé stárnutí
T6	rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí
T7	rozpouštěcí žihání a stabilizace
T8	rozpouštěcí žihání a deformace za studena a umělé stárnutí
T9	rozpouštěcí žihání, umělé stárnutí a deformace za studena
T10	ochlazení,umělé stárnutí a deformace za studena

6 Předválečná a meziválečná historie slitin hořčíku

Na počátku 20. století bylo vyprodukováno za rok cca 15 tun hořčíku. V roce 1943, uprostřed 2. světové války, bylo vyrobeno 248 tisíc tun. Hořčík se v tu dobu používal zejména pro vojenské účely. Po skončení 2. světové války výroba hořčíku prudce klesla z důvodu opadnutí zájmu o jeho vojenské využití a velkých zásob šrotu. V tomto mezi válečným a poté i válečným období bylo největším producentem hořčíkových slitin Německo.

V předválečném a válečném Německu byla hlavní určující normou hořčíkových slitin DIN 1717. Tato norma byla poměrně obecná a vycházela hlavně ze zkušeností a z podnikových norem jednotlivých výrobců. Koncem třicátých let se výroba slitin hořčíku v Německu týkala hlavně tří nejdůležitějších výrobců hořčíkových slitin:

- Chemische Fabrik Griesheim-Elektron v Bitterfeldu, součást koncernu I.G. Farben. Byla největší a jednoznačně nejvýznamnější firmou vyrábějící (nejen) slitiny hořčíku v rámci Třetí říše. V jejich hutích byl vyráběn jak čistý hořčík, tak i slitiny hořčíku s obchodním názvem Elektron. Firma I.G. Farben rovněž vlastnila značné množství patentů, zejména v oblasti slévání hořčíkových slitin. V praxi poskytovala na tyto patenty jednotlivým firmám tzv. licence, ve kterých byly i podrobné postupy a návody. Tyto licence měly zakoupeny i některé naše předválečné firmy, např. Zbrojovka Ing. F. Janeček, Škodovy závody, Českomoravská-Kolben-Daněk a Walter a.s. [7]
- Wintershall A.G., Kassel. Tato německá firma produkovala slitiny hořčíku pod obchodním názvem Magnewin. [7]
- Dürener Metallwerke A.G. Tato huť produkovala slitiny hořčíku pod obchodním názvem agnedur. [7]

Výtah z normy DIN 1717, kde jsou uvedeny tři slitiny Elektron, Magnewin a Magnedur a jejich složení. Ve vztahu k našemu území byly pod jakostmi Mg-Al 3, Mg-Al 6 a Mg-Al 9 za protektorátu vyráběny ve Vítkovických železárnách tvářené slitiny pod názvem Magnesal.

Druh	Označení v DIN 1717	Složení v procentech			Odpovídající značky		
		Al	Zn	Mn	elektron	magnewin	magnedur
ke tváření	Mg-Al 3	2—4	0—1,5	0—0,5	AZ 21, AZ 31	3512	W 383
	Mg-Al 6	6—7	0—1,5	0—0,5	AZM	3510	W 386
	Mg-Al 9	8—11	0—1,5	0—0,5	AZ 855, V 1	3515	W 389
	Mg-Zn	—	4—5	0—0,2	Z 1b	40	W 384
	Mg-Mn	—	—	1—2,5	AM 503, AM 537	3501	W 380
na odlitky	G Mg-Al	7—11	0—0,5	0—0,5	AZ 91, A 8 A8K, A9V	3508 3508 S	—
	G Mg-Al 3-Zn	2,5—3,5	0,5—1,5	0—0,5	AZ 31	—	—
	G Mg-Al 4-Zn	3—4,5	2—3,5	0—0,5	AZF	—	—
	G Mg-Al 6-Zn	5—6,5	2—3,5	0—0,5	AZG	—	—
	G Mg-Mn	—	—	1—2,5	AM 503	—	—
	G Mg-Si	0,5—2% Si			CMSi	—	—

Tabulka 2: výtah z normy DIN 1717 [7]

6.1 Slitiny hořčíku používané v Německu v období 2. světové války

Jak již bylo uvedeno, nejvíce slitin hořčíku vyráběla firma Chemische Fabrik Griesheim-Elektron v Bitterfeldu. Nejznámějšími užívanými hořčíkovými slitinami byly:

Slitina hořčíku A9V

Slitina určená pro odlévání do pískových forem, a především pro následné zušlechťování, které zlepšilo její mechanické vlastnosti zejména pevnost a houževnatost. Samotné zušlechťování spočívalo v ohřevu odlitku na teplotu 420°C ve vakuu. Potom následovalo ochlazování na vzduchu. Tyto hořčíkové slitiny byly v letectví využívány hlavně na bloky motorů, nebo jako menší kryty přístrojů.

Slitina hořčíku AZF

Tato slitina byla také odlévána do pískových forem. Měla malý obsah hliníku, proto nebyla určena pro další zušlechťování. Slitina měla dobrou houževnatost a proto se hodila na součásti namáhané rázy. V leteckém průmyslu se z této slitiny vyráběly oběžná kola, ostruhy a stabilizátory.

Slitina hořčíku AM503

Tato slitina hořčíku byla určena ke tváření. Byla určena pro nízko namáhané části letadel a byla vyráběná a následně dodávaná ve formě plechů, tyčí a profilů. Měla dobrou svařitelnost plamenem a lepší odolnost proti korozi.

Slitina hořčíku AZM

Slitina hořčíku určená ke tváření. Byla využívána hlavně pro namáhané konstrukce letadel. Dodávala se opět ve formě plechů, tyčí a profilů. Její nevýhodou byla horší svařitelnost.

Druh	Značka	Normální složení v %			Stav	Mechanické vlastnosti					
		Al	Zn	Mn		mez pružnosti (0,02%) kg/mm ²	mez průtaž- nosti (0,2%) kg/mm ²	pevnost v tahu kg/mm ²	tažnost na 10d %	tvrdost Brinell	mez únavy*) kg/mm ²
Ke slévání	AZG	6,0	3,0	0,3	litý do písku	4—5	9—10,5	16—20	3—6	50—58	7—8
	AZF	4,0	3,0	0,3	litý do písku	4	8—9	17—21	5—9	47—52	5,5—7,5
	A9V	8,5	0,5	0,3	litý do písku a zušlech.	4,5—5	10—11	24—27	8—12	56—63	8—10
	AZ 91	9,0	1,0	0,3	litý do kokily	5	11—13	18—22	2,5—5	60—65	7—8
Ke tváření	AZM	6,5	1,0	0,3	plech	10	18—22	28—32	10—14	58—63	
					tyče a výlisky	17—19	20—22	28—32	11—16	60—65	13
	AZ 855	8,0	0,3	0,2	kované vrtule	18—20	21—23	29—32	8—12	68—75	13—14
	AZ 31	3,0	1,0	0,3	plech		16—18	25—28	12—18	55—60	
	AM 503	—	—	1,5	plech	5	8—14	19—23	5—10	39—42	
					tyče a profily	8—10	14—17	19—23	1,5—5	41—46	7
	V 1	10,5	—	0,3	lisované písty	19—21	23—28	33—37	7—9	70—78	12

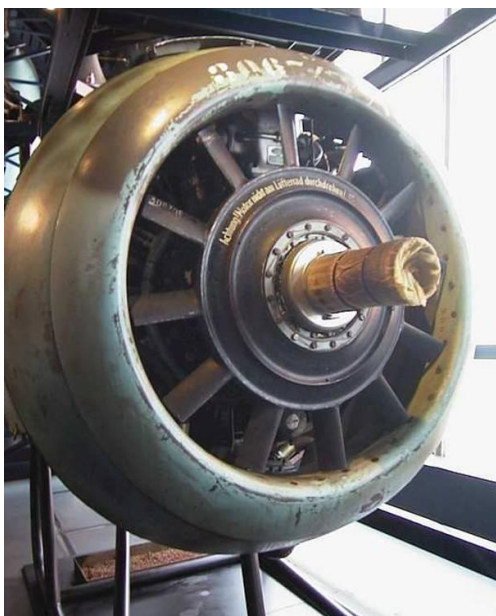
Tabulka 3: tabulka slitin Mg firmy Chemische Fabrik Griesheim-Elektron v Bitterfeldu [7]

7 Využití hořčíkových slitin v konstrukci letadel

7.1 Využití hořčíkových slitin historické v Německém průmyslu

Ventilátor motoru BMW 801

Příkladem užití hořčíkové slitiny v letectví je ventilátor nuceného proudění vzduchu u leteckého motoru BMW 801A. Jeho hlavním úkolem bylo chlazení válců motoru vzduchem. Z hlediska konstrukce jde o 12-ti lopatkový ventilátor. Průměr ventilátoru je 32 palců. Samotný ventilátor byl poháněn od klikového hřídele motoru pohonem „do rychla“ v poměru 1,72, což bylo ekvivalentní poměru 3,17 vůči vrtuli[7]. Z toho plyne, že byl tento ventilátor schopen chlazení motoru při nízkých rychlostech nebo pohybu letadla na zemi.

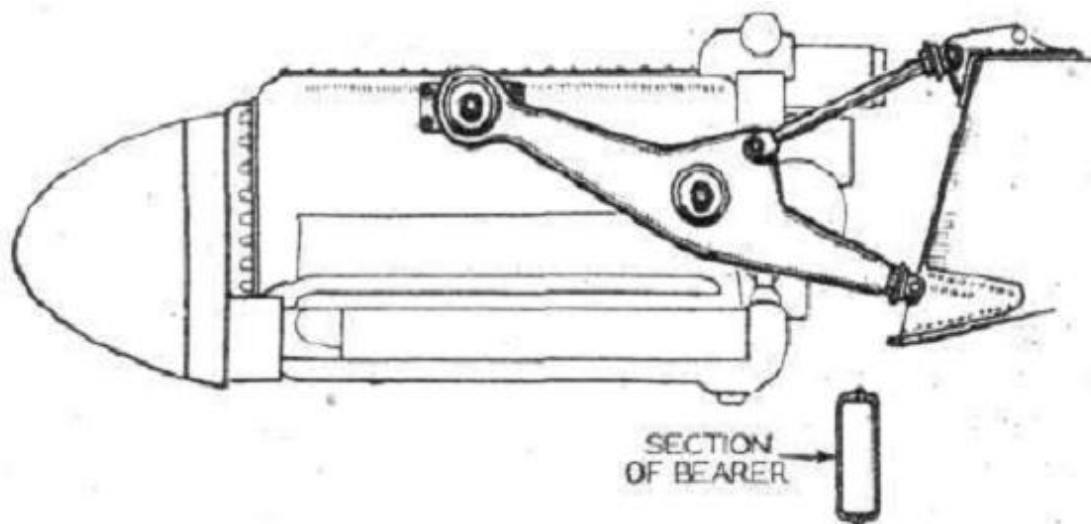


Obr. 5: Motor BMW 801a ventilátorem z hořčíkové slitiny [7]

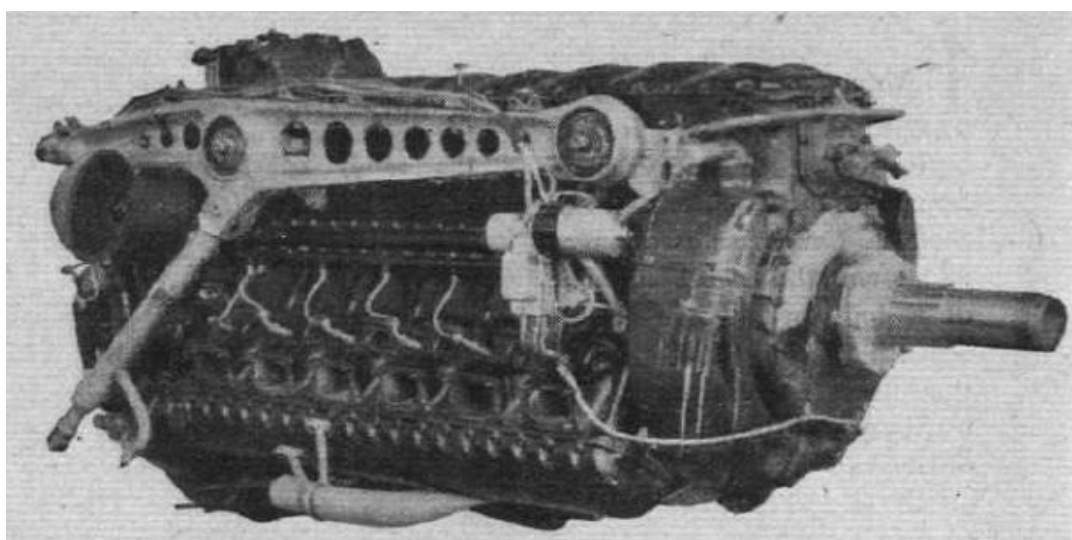
Zavěšení motorů u letadel Heinkel 111 a Me-210A-1

Další možností použití hořčíkových slitin bylo uložení (zavěšení) řadových (vidlicových) leteckých motorů. První užití skýtalo zavěšení motoru DB 601 F na letounu Me-210 A-1. Zavěšení viz obr.č.6 se skládá z hlavního ramene a horního držáku. Horní držák byl vyroben z oceli a hlavní rameno bylo vyrobeno z hořčíkové slitiny. Užití hořčíkových slitin bylo také u motoru Jumo 211 z letounu Heinkel 111, což můžeme vidět na obr. č.7. Zde je celé rameno z hořčíkové slitiny a držák patrně z oceli.

První užití hořčíkové slitiny na výrobu hlavního zavěšovacího ramene u leteckých motorů bylo použito u letadla Me-109, z kovací slitiny AZ 855.



Obr. 6: Uložení (zavěšení) motoru DB 601 F v letounu Me-210A-1 [7]



Obr. 7: Uložení (zavěšení) motoru Jumo 211 letadlo Heinkel 111 [7]

Další užití u letadel Focke-Wulf Fw 200 Condor, Heinkel 111, Heinkel 177, Junkers 88 U letadla Focke-Wulf Fw 200 Condor, bylo na různých místech křídel a podvozku použito 500kg hořčikové slitiny AM 503. Letadlo Heinkel 111 mělo celkem v konstrukci použito 80-100kg hořčikových slitin hlavně slitiny AM 503. Na jiný typ Heinkelu "Heinkel 177", bylo užito třeba kolem 500kg hořčikových slitiny. Na Junkersu Ju 88 bylo použito kolem 350kg hořčikových slitiny, ve všech těchto případech se hořčikové slitiny hlavně využívaly v konstrukcích části trupu a křídel. Další možností využití slitin hořčíku bylo u střemhlavého bombardéru Junkers Ju 87, kde byly vyrobeny ze slitin hořčíku klapky, nebo velké využití hořčikových slitin bylo také u letounů Arado 196 a Arado 79 v částech konstrukce draku.

7.2 Využití Hořčikových slitin v současné době

Největšími výrobci a producenty hořčikových slitin v letectví byli v druhé půlce 20. století Sovětský svaz, a na druhé straně západní země v čele s USA.

Experimentální letadlo Lockheed F-80C (obr. 8), mělo celou svojí konstrukci tvořenou z hořčíku.



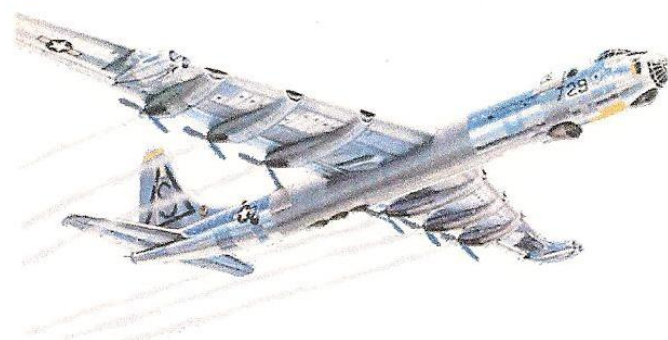
Obr.8: letadlo Lockheed F-80C [8]

Sovětský bombardér TU-95MS (obr.9), který obsahoval až 1550kg hořčíku.



Obr.9: letadlo TU-95MS [8]

Letadlo Convair B-36 Peacemaker (obr. 10), obsahoval téměř 8600kg. hořčíku, z čehož bylo téměř 700kg hořčíkových slitin vyrobeno kováním.



Obr.10: letadlo B-36 Peacemaker [8]

Hořčíkové slitiny byly a jsou využívány i u vrtulníků, např. na součásti převodovek nebo jiných konstrukčních prvků, např. u vrtulníku Sikorsky S-56 (obr. 11), Westland Aircraft, kde bylo využito 115kg hořčíkových slitin (obr. 12).

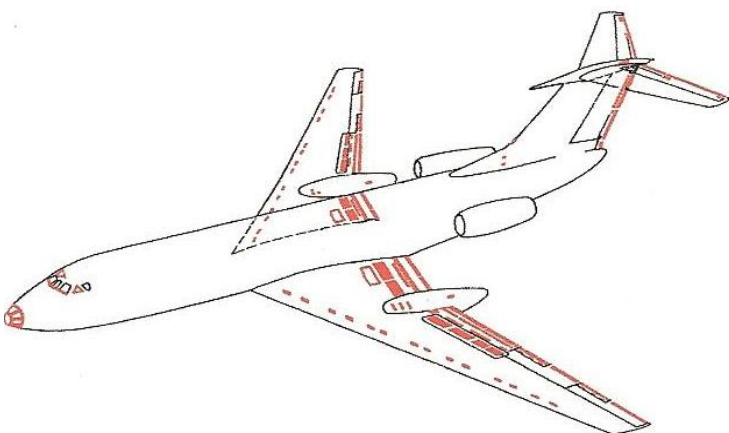


Obr.11: vrtulníku Sikorsky S-56 [8]



Obr.12: součástky z hořčíkových slitin u vrtulníků a mobilního telefonu [8]

V civilním letectví využíval nejvíce hořčíkové slitiny Sovětský svaz, u letadla Tupolev TU-134 (obr. 13) bylo použito hořčíkových slitin v celkové hmotnosti 780kg. Naproti tomu srovnatelný letoun Boeing 737 má vyrobeno z hořčíkových slitin pouze několik součástí. Na počátku 90. let byla částečně omezena aplikace hořčíkových slitin v letectví, ale s vývojem nových technologií se v poslední dekádě využívají hořčíkové slitiny stále více, s pozitivním výhledem do budoucna.



Obr.13: Vyznačená místa využití hořčíkové slitiny u letadla TU-134 [8]

8 Závěr

Lze konstatovat, že hořčíkové slitiny jsou slitiny vhodné pro letectví. A to i přesto, že mají některé negativní vlastnosti z hlediska mechanického namáhání, odolnosti vůči korozi nebo z hlediska výroby. Hořčíkové slitiny např. nedosahují mechanických vlastností hliníkových slitin, tudíž je v mnoha případech nemohou nahradit.

Jejich největší výhodou pro letecký průmysl je jejich nízká měrná hmotnost. Vhodným výběrem legujících prvků se dá docílit zlepšení korozivzdornosti, také zlepšení mechanických vlastností za vyšších teplot a v neposlední řadě tlumení vibrací. Což jsou také nejdůležitější vlastnosti v leteckém průmyslu. Další zajímavostí hořčíkových slitin je jejich dobrá měrná pevnost R_m/ρ . To znamená, že pokud by měl stejnou hmotnost výrobek z hořčíkové slitiny, oceli a slitiny hliníku, mechanické vlastnosti oceli a slitin hliníku by byly podstatně horší, tato výhoda se dá využít v kosmickém nebo leteckém průmyslu.

Důležitou vlastností hořčíkových slitin na bázi Mg-Al je také tvorba intermetalické fáze γ , která výrazně ovlivňuje vlastnosti těchto slitin a jejich následné využití v konstrukci. Legování se snaží buďto odbourat nebo nějakým způsobem posílit tvorbu této fáze. Z hlediska budoucnosti lze předpokládat, že pro letectví budou nejzajímavější slitiny Mg-Li, zejména pro svojí nízkou měrnou hmotnost, nebo slitiny Mg-Al, legované vhodným prvkem (Li, RE) z důvodů dobrých mechanických vlastností této nejrozvinutější skupiny hořčíkových slitin, případně hořčíkové slitiny s yttriem.

9 Literatura:

1. GREGER, Miroslav; KARAS, Vlastimil ; VLCEK, Michal, KUŘETOVÁ Barbora, KOCICH Radim . . *VÝUŽITÍ VÝKOVKU Z HORČÍKOVÝCH SLITIN*. In,[online]. . 13. –15. 5. 2008, . Hradec nad Moravicí : METAL 2008 , [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2008/sbornik/Lists/PrispevekProgram.htm#58>>.sekce E14
2. ČECH , Jaroslav,; JUŘIČKA , Ivo; BOUCNÍK , Pavel. *POUŽITÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ. 5. Medzinárodná vedecká konferencia CO-MAT-TECH*[online]. . Trnava 14.10. - 15.10.1997, [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW: <http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf>.
3. LOSERTOVA, Monika. *Učební text pro předmět úvod do nauky materiálu* . 2007. VŠB-TU : VŠB-TU, 2007 [cit. 2011-05-20]. Hořčíkové slitiny, s. . Dostupné z WWW: < <http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/Unom.html>>.pod názvem Slitiny kovů I- Mg
4. PTÁČEK, Luděk.: *Nauka o materiálu. II. 2. opravené a rozšířené vydání* Brno, CERM, 2002. 392 str. ISBN 80-7204-248-3, pracovní text str.187-189
5. PTÁČEK, Luděk; HÁSEK, Petr. *Struktura a vlastnosti Polykomponentních Slitin Hořčíku : Structure and properties of polycomponent magnesium alloys*. In [online]. Hradec nad Moravicí, [s.n.], Metal 2004 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2004/sbornik/>>.
6. PTÁČEK, Luděk. *Slitiny hořčíku – současný stav vývoje a použití*. In *Slitiny hořčíku – současný stav vývoje a použití* [online]. Metal 2001. 15. - 17. 5. 2001, Ostrava, Czech Republic : Metal 2001 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2001/sbornik/>>.
7. Ikala., *Palba.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-05-20]. Německé slitiny hořčíku. Dostupné z WWW: <<http://www.palba.cz/viewtopic.php?t=3488>>.
8. OSTROVSKY, I.; HENN, Y. *MAGNESIUM APPLICATION IN*. In *PRESENT STATE AND FUTURE OF MAGNESIUM APPLICATION IN : International Conference "NEW CHALLENGES IN AERONAUTICS"* [online]. August 19-22, 2007, Moscow : [s.n.], 2007 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.magnesium-technologies.com/var/249/76510-PAPER%20-%20PRESENT%20STATE%20AND%20FUTURE%20OF%20MAGNESIUM%20APPLICATION%20IN%20AEROSPACE%20INDUSTRY.pdf>>.
9. Drápala, J. et al.: *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. 172 s.
10. Friedrich, Horst E.; Mordike, Barry L.. *Magnesium Technology* [online]. 2006. [s.l.] : Springer - Verlag, 2006 [cit. 2011-05-20]. Metallurgy, Design Data, Applications, s. . Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1284&VerticalID=0>
11. *Military Handbook - MIL-HDBK-5H: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures (Knovel Interactive Edition)*.. U.S. Department of Defense. [cit. 2011-05-20]. Dostupné z. http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=754&VerticalID=0
12. HOMBERGSMEIER, Elke ; EADS DEUTSCHLAND INNOVATION WORKS,. *MAGNESIUM FOR AEROSPACE APPLICATIONS*. - [online]. -, 1, [cit. 2011-05-20]. Dostupný z WWW: <http://www.materials.manchester.ac.uk/pdf/research/latest/magnesium/elke_hombergsmeyer_AEROMAG%20P aper_07.pdf>.
13. *Přednášky do předmětu Úvod do materiálových věd a inženýrství, VUT FSI, Ústav materiálových věd a inženýrství* [cit. 2011-05-20] [online]. Dostupné z <http://ime.fme.vutbr.cz/bumls007FP.php>, nezelezné kovy